

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2006

JAN GOTVALD

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv technologických podmínek vstřikování na smrštění výstřiků z nanokompozitu

Influence of technological conditions of injections on nanocomposite contraction

Jan Gotvald

KSP – TP – B12

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Weinlich - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	41
Počet tabulek	8
Počet příloh	0
Počet obrázků	20

Datum: 14.5.2006

MÍSTO PRO ORIGINÁL ZADÁNÍ (DLE DOPORUČENÉHO KLADU LISTŮ)

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Posluchač : Jan Gotvald

Téma práce: Vliv technologických podmínek vstřikování na smrštění
výstřiků z nanokompozitu

Influence of technological conditions of injections on
nanocomposite contraction

Číslo BP: KSP-TP – B12

Vedoucí BP: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Petr Weinlich - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se v teoretické části zabývá charakteristikou polymerních nanokompozitů včetně metod jejich přípravy. Popisuje metody pro stanovení smrštění při vstřikování termoplastických materiálů.

V experimentální části je provedeno měření a vyhodnocení vlivu technologických podmínek vstřikování na výrobní smrštění výstřiků z nanokompozitu.

Abstract:

This project deals in its theoretical part with characteristics of polymeric nanocomposites including methods of their processing. It describes methods for a determination of a contraction of thermoplastic materials by injecting.

The experimental part informs about a measuring and an assesment of an influence of technological circumstances of an injection on a processing contraction of a nanocomposite inject.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 14.5.2006

.....

Jan Gotvald
Vrchlického 436
506 01 Jičín

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubošovi Běhálkovi za odborné vedení bakalářské práce, poskytování rad a informačních pokladů.

Dále děkuji svému konzultantovi Ing. Petru Weinlichovi za poskytování konzultací, odborných podkladů a systematické vedení při zpracovávání bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	8
2	Teoretická část	10
2.1	Úvod do nanokompozitních materiálů	10
2.2	Nanokompozity	10
2.3	Nanoblend™ koncentráty	12
2.4	Technologie přípravy kompozitů s nanočásticemi	14
2.4.1	Polymerace In-situ	14
2.4.2	Roztoková polymerace	15
2.4.3	Příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru	16
2.4.4	Metoda SOL – GEL	19
2.4.5	Charakterizace nanokompozitů typu polymer / jíl	19
2.5	Smrštění termoplastů	19
2.5.1	Stanovení velikosti smrštění u termoplastů	20
2.5.2	Výrobní smrštění	21
2.5.3	Dodatečné smrštění	21
2.5.4	Celkové smrštění	22
3	Experimentální část	23
3.1	Volba polymerního nanokompozitu	23
3.2	Zhotovení zkušebních vzorků a volba tech. parametrů	23
3.3	Měření vzorků	25
3.4	Výpočet výrobního smrštění	27
4	Vyhodnocení výsledků	32
5	Závěr	37
	Literatura	39

Seznam použitých zkratk a symbolů

A, B	Označení tvarových dutin formy
S_M [%]	Výrobní smrštění
S_{Mn} [%]	Výrobní smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny
S_{Mp} [%]	Výrobní smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny
S_p [%]	Dodatečné smrštění
S_{Pn} [%]	Dodatečné smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny
S_{Pp} [%]	Dodatečné smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny
S_T [%]	Celkové smrštění
S_{Tn} [%]	Celkové smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny
S_{Tp} [%]	Celkové smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny
PA	Polyamid
PMMA	Polymethylmetakrylát
PVOH	Polyvinylalkohol
PVPPyr	Polyvinylpyrrolidon
HDPE	Vysokohustotní polyethylen
UHMW-PE	Ultravysokomolekulární polyethylen
PEO	Polyetylénoxid
PP6	Polypropylen 6
l_c [mm]	Délka ve středu tvarové dutiny
b_c [mm]	Šířka ve středu tvarové dutiny
l_1 [mm]	Délka zkušebního tělesa
b_1 [mm]	Šířka zkušebního tělesa
T_F [°C]	Teplota formy
T_t [°C]	Teplota taveniny
T_m [°C]	Teplota temperačního média
TEOS	Derivát silanu

1 ÚVOD [1], [2], [3]

Historie lidstva prošla mnoha obdobími, v nichž se v určitém časovém intervalu dosáhlo velkého pokroku ve zpracování materiálů, kterých se v té době hodně používalo. Lidé tak žili v době kamenné, bronzové nebo železné. Tyto časové intervaly byly velmi dlouhé. V posledních stoletích však došlo k tak rychlému rozvoji v mnoha oblastech lidské činnosti jako jsou například věda, medicína, elektronika a jiná odvětví, že takový rychlý vývoj nikde v historii nenajdeme.

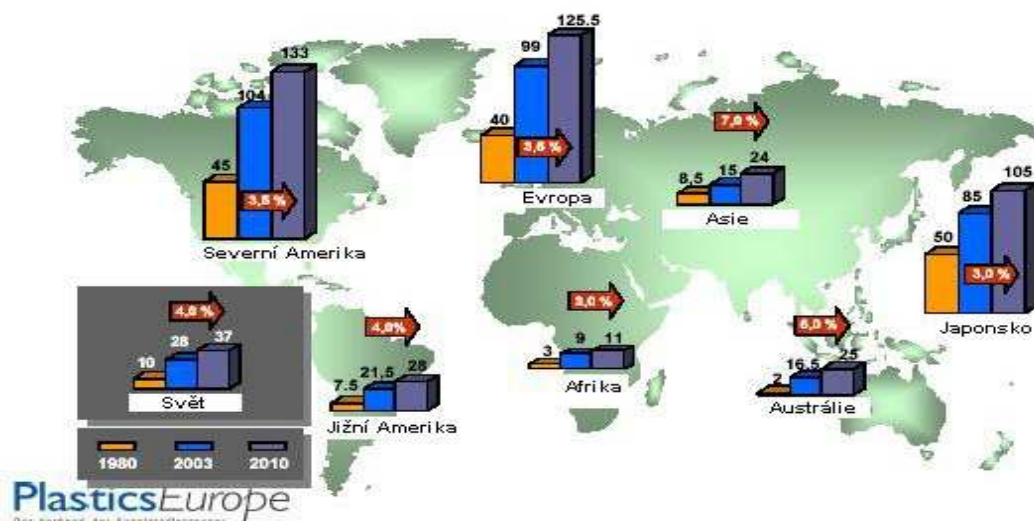
Na konci 19. století tak vznikl i nový materiál, plast. Na začátku byly plasty připravovány pomocí chemických úprav přírodních surovin, ale jak se později ukázalo, největší význam pro vývoj měly plasty vyrobené zcela synteticky. K rozvoji výroby z plastů přispělo to, že plasty je možno nahradit tradičními materiály, jako jsou například sklo nebo kov. Z počátku byly vyráběny z plastů jen jednoduché výrobky, například hračky, domácí potřeby a jiné, protože s tímto materiálem ještě nebylo tolik zkušeností. Postupem času však začaly pronikat i do náročnějších aplikací a dnes už si bez těchto výrobků nedokážeme svoji činnost představit. Mezi výhody plastů (resp. polymerních materiálů) a jejich výrobky patří výborná zpracovatelnost, nízké výrobní náklady, malé procento odpadů, nižší měrná hmotnost než u kovových nebo skleněných produktů apod.

Průmysl plastů je celosvětový dynamický obor. Světová spotřeba plastů rostla v posledních 30 letech meziročně průměrně o 4,0 %. Prognózy do roku 2010 předpovídají nárůst celosvětové spotřeby plastových materiálů na člověka z 28 kg v roce 2003 až na 37 kg v roce 2010 (viz obr 1.1).

Postupem času začaly v oblasti polymerních materiálů nabývat na významu polymerní směsi, kompozity, materiály vyráběné na míru (zákazník si koupí materiál, který bude vlastnostmi nejvíce vyhovovat funkčnosti výrobků) a dnes také polymerní nanokompozity. U běžných plastů jsou základní vlastnosti popsány v materiálových listech. Plasty však bývají obohaceny o aditiva, která mohou mít pozitivní vliv na primárně požadované vlastnosti, avšak na ty vedlejší, kterým nepřikládáme takovou váhu, naopak vliv negativní. U finálního výrobku to může být odraženo v jeho nižší užitné hodnotě.

Technologie a podmínky zpracování polymerních materiálů výrazně ovlivňují výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti výrobků, v závislosti na

utváření morfologie plastu v průběhu těchto procesů. Jedním z parametrů důležitých pro rozměrovou a tvarovou stálost výrobku, je také velikost výsledného smrštění. Úkolem této práce je zhodnotit význam vlivu technologických podmínek vstřikování na velikost výrobního smrštění u polymerních nanokompozitů, která navazuje na řadu studií věnované problematice smrštění u běžných termoplastů.



Obr. 1.1 Světová spotřeba plastů na člověka v kg [2]

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Úvod do nanokompozitních materiálů [4], [5]

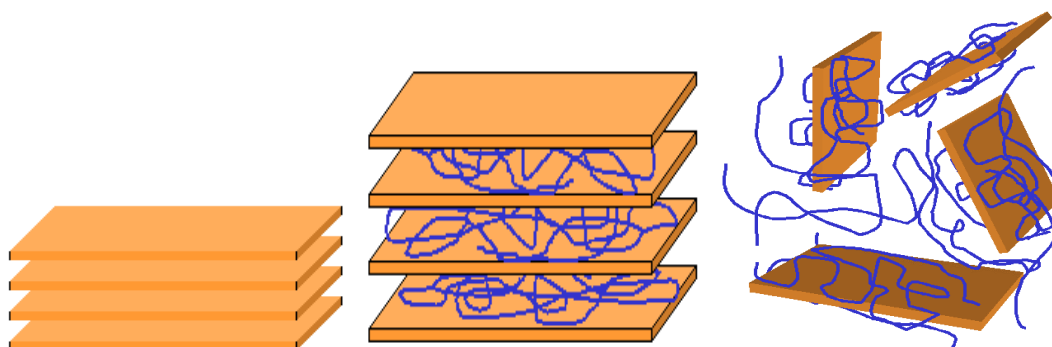
Plasty patří mezi moderní konstrukční materiály, které jsou využívány pro své některé příznivé vlastnosti jako je např. nízká měrná hmotnost, snadná tváritelnost, nízká elektrická vodivost, apod. Mají však také některé záporné, pro praxi nevýhodné vlastnosti. Tyto nedostatky plastů se dají částečně nebo někdy i zcela úplně odstranit. Děje se tak použitím přísad, aditiv. Vlastnosti plastů, od fyzikálních přes mechanické, chemické, tepelné, elektrické apod., je tedy možné upravovat přidáním různých přísad, a to jak vyztužujících, tak nevyztužujících. Pokud ke změně mechanických nebo jiných vlastností použijeme vyztužující plnivo, potom mluvíme o tzv. polymerních kompozitech. Do nedávné doby byla pro tyto účely používána zejména vlákna a textilie. U vláken jsou zpravidla dva rozměry řádově menší, než rozměr třetí a průměr vláken se pohybuje od 10^{-1} mm do 10^{-3} mm. V posledních několika letech probíhá intenzivní vývoj plniva, jehož jednotlivé částice mají alespoň jeden rozměr v řádu několika nanometrů, tj. 10^{-9} mm. Takto připravené materiály se nazývají polymerní nanokompozity. Jedná se o nové progresivní a moderní materiály, mezi jejichž hlavní přínosy patří zlepšení fyzikálních vlastností polymeru snížením množství přidávaného plniva a tím snížení celkové hmotnosti dílce, vyšší tuhost a odolnost proti rázu a poškrábání, menší deformace v důsledku tepla, dobrá přilnavost laků u vzhledových dílů, výrazně nižší propustnost pro plyny a kapaliny. S ohledem na vývoj polymerních nanokompozitů se zdá, že v příštím desetiletí se nanokompozitní technologie stanou špičkovým zpracovatelským procesem.

2.2 Nanokompozity [4], [5]

Pro vyztužení plastů, jako polymerní matrice, se používá velké množství materiálů, jako je sklo, uhlík, apod. a také různé tvary vyztužujících přísad, kdy nejvíce rozšířenými jsou vlákna. Pro vyztužení polymerních maticí lze však také použít materiály globulárního nebo vločkovitého tvaru. Jak již bylo uvedeno v předcházející kapitole vyvíjejí se v poslední době poměrně nové kompozitní materiály, v nichž se k vyztužení používají částice o rozměru menším nebo rovném 1 nm. Takový kompozit je potom nazýván

nanokompozitem. V nedávné minulosti bylo vyvinuto pouze malé množství komerčně využitelných nanokompozitů, ale jejich potenciál odstartoval bouřlivý výzkum v této oblasti.

V současnosti existuje několik druhů nanokompozitů. Nejintenzivněji zkoumaný druh nanokompozitů používá jako vyztužující fázi vrstevnaté minerální jíly. Jedná se o skupinu polymerů plněných minerálními plnivými, které obsahují relativně malé množství ($<10\%$) jílových částic o rozměru 10^{-9} m. Tyto materiály se těší velkému zájmu vědecké i zpracovatelské komunity a to díky dostupnosti daného typu plniva a jeho uplatnění v komoditních polymerech. Mezi nejužitečnější jíly v této souvislosti patří ty, jejichž struktura je schopna přijmout malé molekuly, a tak nabobtnat. Jeden takový jíl se nazývá montmorillonit (viz obr. 2.1). Jedná se o vrstevnatý aluminosilikát. Při správných podmínkách mohou být volné prostory vyplněny monomerem, oligomerem nebo polymerem. Tímto dojde ke zvětšení vzdálenosti mezi jednotlivými destičkovitými útvary jílu a nastane jeho nabobtnání. Destičkovité částice jílu nabobtnané polymerem se nazývají interkalované (vmezežené). Pokud jíl nabobtná tak, že již nadále nemá organizovanou vrstevnatou strukturu, říkáme, že je exfoliován (dojde k odloupení jednotlivých vrstev).

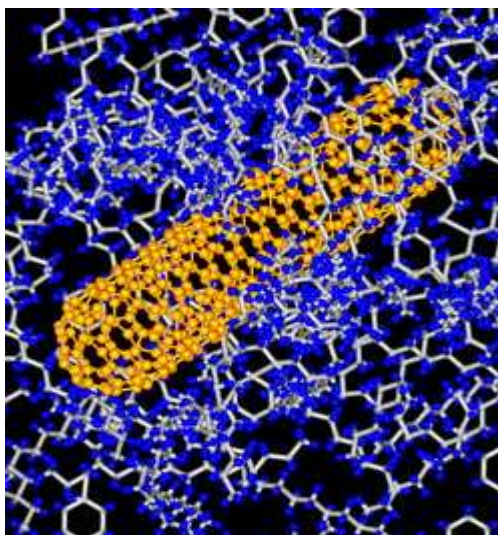


Obr. 2.1 Struktura montmorillonitu (vlevo), interkalovaného (uprostřed) a exfoliovaného nanokompozitu (vpravo) [5]

Vrstevnaté křemičité jíly jsou od přírody silně hydrofilní (tzn. mají schopnost přijímat vodu). Kvůli této vlastnosti jsou velmi nevhodné ke směšování a ke vzájemné interakci s většinou polymerních maticí. Kromě toho shluky jílových destiček jsou pevně drženy pohromadě elektrostatickými silami. Z těchto důvodů musí být jíl před tím, než je možno ho použít k výrobě nanokompozitu upraven. Shluky destiček jsou mnohem větší než 1 nm ve všech třech směrech. Výroba kompozitu z takto neupraveného jílu by měla za

následek velmi neefektivní využití materiálu, protože většina jílu by byla slepena uvnitř shluků a neměla by tak možnost interakce s matricí.

Výrobci kompozitů jsou si velmi dobře vědomi výhod plniva, kde je velký rozdíl mezi jeho tloušťkou a ostatními rozměry. Pouze nedávno objevily věda a průmysl příznivý efekt kombinace velkého poměru rozměrů plniva a zároveň nano rozměrů. Protože se velikost částice několika nm řádově blíží velikosti molekuly matrice, je umožněno velmi blízké střetnutí obou těchto materiálů za předpokladu, že povrch částic jílu je důkladně povrchově modifikován. Interakce mezi částicí a molekulou matrice vytváří na povrchu částice vázanou oblast, která znemožní pohyb části polymerní matrice (viz obr. 2.2). Nanočástice vylepšují fyzikální vlastnosti polymerů a mohou snížit množství přísad potřebných k dosažení požadovaných vlastností jako je například snížení váhy v porovnání s tradičními materiály.



Obr. 2.2 CNT – Polymer Composit [6]

2.3 Nanoblend™ koncentráty [7]

Nanojíly jsou velmi jemné částice velikosti přibližně jedné desetitisíciny průměru lidského vlasu a tvoří ca 40 hmot. % váhy tzv. nanoblend koncentrátu, což jsou materiály, které vynikají dobrými technickými parametry. Nové nanoblend koncentráty nahrazují tradiční minerální nebo skleněné výztuhy a nehořlavé přísady v široké škále pryskyřičných směsí. Vývoj celé skupiny produktů nanoblend koncentrátů je prvním výsledkem spojení mezi firmami PolyOne a Nanocor Inc., největšího dodavatele nanojílů pro plasty a plně vlastněného společností AMCOL.

Nanoblend koncentrát napomáhá začlenění a rozptýlení jílu do polymerní matrice a tím vytvoření nanokompozitní struktury během konečného zpracování. Jemné částice jílu jsou rozptýleny v polymerní matici a tvoří tak snadno zpracovatelný granulát. Použití nanoblend koncentrátů a granulátů pomáhá překonat některé dřívější obtíže, které se vyskytly při pokusech začlenit nanojíly přímo do směsi a dále mohou být použity v širokém spektru procesů, aniž by bylo nutno dělat ústupky u procesních parametrů. Jednou z největších výhod zpracování nanojílů je skutečnost, že není potřeba vynakládat prostředky na zakoupení speciálního vybavení nebo významně měnit podmínky výroby. Ve skutečnosti mohou být nanojíly v mnoha případech snadněji zpracovatelné na stávajících zařízeních, než jiná tradiční plniva. Při použití technologie vstřikování lze využít standardní stroj na zpracování plastů. Vstřikovací teplota nesmí překročit 250 °C, jinak by došlo k degradaci materiálu.

Další vlastností je to, že exfoliované nanojíly jsou ve většině polymerních systémů průhledné, protože jednotlivé destičky mají rozměry v jednom směru v řádech nanometrů. Pevně svázaná struktura s polymerní maticí je navíc nepropustná pro plyny a kapaliny a nabízí tak vyšší bariérové vlastnosti, než čistý polymer.

Přínosem nanoblend koncentrátů je na základě odborné rešerše především:

- vyšší odolnost proti hoření (viz obr 2.3)
- příznivější poměr váha / cena výrobku
- zlepšení kvality povrchové vrstvy nanokompozitu
- vyšší odolnost nanokompozitu proti chemikáliím
- lepší fyzikální vlastnosti
- vyšší bariérové vlastnosti pro kapaliny a plyny



Obr. 2.3 Rozdíl při působení plamene po dobu 120 sekund mezi PP s nanoblendem (vlevo) a neplněným PP (vpravo) [7]

2.4 Technologie přípravy kompozitů s nanočásticemi

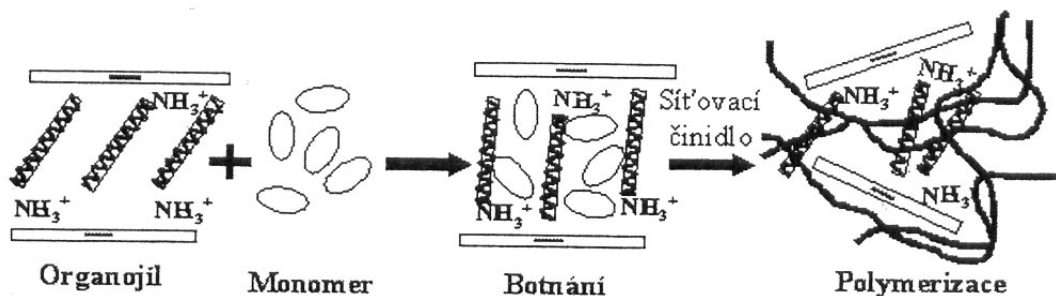
Obecně jsou známy 4 hlavní způsoby přípravy nanokompozitů a to

- polymerace in-situ
- roztoková polymerace
- příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru
- metoda SOL – Gel

V současnosti se věnuje nejvíce pozornosti předposlední jmenované technice. Je to dáno její jednoduchostí a možností využití stávajícího strojního vybavení při přípravě nanokompozitů.

2.4.1 Polymerace In-situ [5], [8]

Jedním z prvních připravených nanosystémů byl nanokompozitní polyamid 6, při jehož přípravě se uplatnila technika polymerace in-situ. Dnes již představuje běžný proces používaný pro přípravu nanokompozitů. V prvním kroku je organojíl nabobtnán v monomeru. Následně je přidán přídavek síťovacího činidla a proces je ukončen samotnou polymerizací (viz obr. 2.4). Polymerizace může být zahájena tepelným působením, radiačně, difúzí iniciátoru do mezivrstev nebo katalyzátorem zabudovaným v mezivrstvě plniva. Touto technikou lze vyrobit např. nanokompozity na bázi nenasycených polyesterů, polyuretanů nebo polystyrenu.



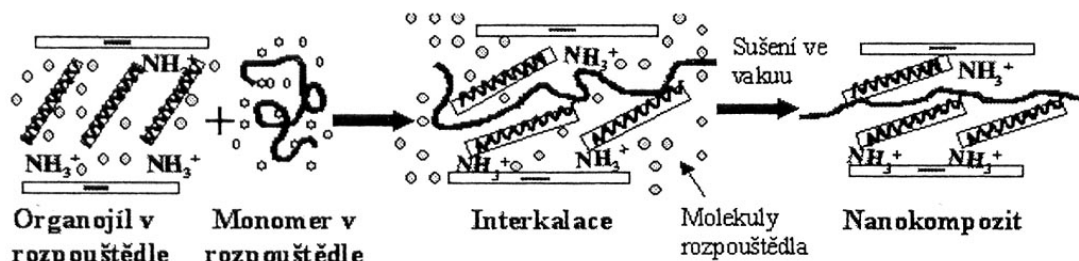
Obr. 2.4 Polymerizace in-situ. Polární molekuly monomeru difundují mezi vrstvy jílu [8]

Velmi důležitou skupinu studovaných polymerů představují polyolefiny. Technikou polymerace in-situ se podařilo již v laboratořích připravit interkalované/exfoliované typy nanokompozitů, jejichž základem je vysokohustotní polyethylen (HDPE). Metoda přípravy takového kompozitu je založena na ukotvení katalyzátoru Ziegler-Nattova nebo aktivních metalocenů na povrchu plniva a následné polymeraci in-situ. Nanokompozitní systém lze vytvořit pouze v případě organofilizovaných jíků. Přírodní neupravené jíly a příprava mícháním taveniny v případě polyolefinů dává vzniknout pouze mikrokompazitním systémům. Touto cestou je možné připravit i UHMW-PE. Intenzivně se pracuje i na přípravě elastomerních nanokompozitů.

2.4.2 Roztoková polymerace [5], [8]

Při přípravě polymerních nanokompozitů roztokovou polymerací je postup podobný polymeraci in-situ s tím rozdílem, že místo monomeru je použito rozpouštědlo vhodné pro daný typ polymeru. Organojíl je dispergován v polárním rozpouštědle, např. v toluenu, kde dochází k jeho nabobtnání. Následně je v daném rozpouštědle rozpuštěn polymer. Oba roztoky se smísí a dochází k interkalaci mezi vrstvy organojílu. Posledním krokem přípravy je odstranění rozpouštědla (viz obr. 2.5). Vrstvy jílu se následně znovu seskupí a polymerní řetězce se zafixují v mezivrstvích. Vzniká tak mnohvrstevná struktura, tzv. interkalované nanokompozity. Roztokovou polymeraci je možné použít například pro přípravu nanokompozitů na bázi polyetylenu nebo polyamidu.

Tato technika se uplatňuje i u polymerů rozpustných ve vodě např. polyvinylalkoholu (PVOH), polyetylénoxidu (PEO) a polyvinylpyrrolidonu (PVPPyr). Silná interakce mezi vodným roztokem makromolekul a silikátovými



Obr. 2.5 Roztoková polymerace. Šedé tečky představují molekuly rozpouštědla [8]

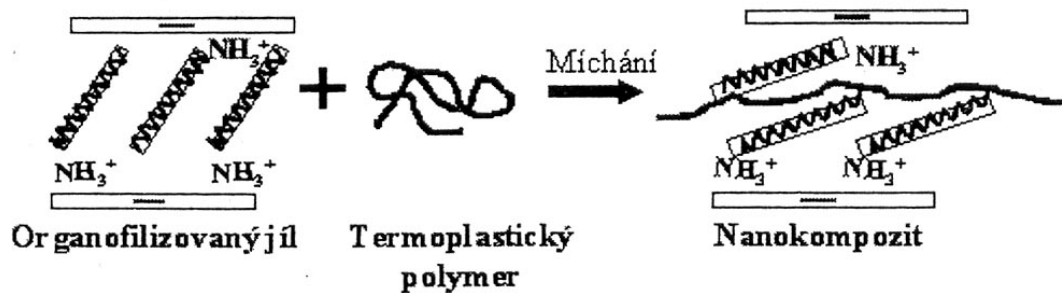
vrstvami často spouští proces znovuseskupení delaminovaného silikátu. To znamená, že výsledkem je interkalovaný nanokompozit. Mohou zde však společně existovat i interkalované a exfoliované struktury.

Studována byla také možnost využití této techniky pro emulzní polymerace. Cílem těchto studií bylo ověřit možnost interkalace ve vodě nerozpustných polymerů mezi vrstvy montmorillonitu, který se ve vodě snadno delaminuje. Jako první zkušební polymer byl vybrán polymetylmetakrylát (PMMA). Stejná technologie byla použita i pro přípravu interkalovaného polystyrenového nanokompozitu. Tyto pokusy ukazují na skutečnost, že vrstevnaté silikáty se do jisté míry pravděpodobně účastní polymerace.

Výhodu této techniky je možnost přípravy nanokompozitů jejichž základem jsou jen málo polární a nebo nepolární polymery. Nevýhodou je však použití rozpouštědla, které musí být následně odstraněno a to jak z ekologického tak i z ekonomického hlediska.

2.4.3 Příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru [5], [8]

Podstata tohoto způsobu přípravy nanokompozitů spočívá v míchání roztaveného termoplastu s upraveným organojílem a v následném ochlazení směsi (viz obr. 2.6). Skutečnost, že polymerní řetězce se mohou při transportu hmoty vmezeřit mezi vrstvy organojílu je překvapující, neboť gyrační poloměr polymerního klubka je mnohem větší, než mezivrstevní vzdálenost jednotlivých vrstev organojílu. Jako první se o této technice zmínil v roce 1993 prof. Vaia [9].



Obr. 2.6 Příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru [8]

Termodynamika, která umožňuje interkalaci polymeru v roztaveném stavu mezi vrstvy jílu je postavena na teorii již zmíněného prof. Vaia a Giannelise. Obecně je výsledek polymerní interkalace určen souhrou entropických a entalpických faktorů. Ve skutečnosti má uvěznění polymerního řetězce mezi silikátové vrstvy na svědomí snížení celkové entropie makromolekulárních řetězců, tato ztráta je podle prof. Vaia kompenzována rostoucí konformační volností vázaných řetězců interkalátu na anorganické vrstvě plniva v důsledku rostoucí mezivrstvní vzdálenosti. Hnací silou procesu je tedy entalpický příspěvek interakce mezi polymerem a organicky modifikovaným jílem.

Výzkumnými týmy je v současnosti připravováno velké množství polymerů typu polymer/jíl, od silně polárních PA6, až po mírně polární polystyren. Problémy přetrvávají u nepolárních polymerů jako je polyetylén a polypropylen. Tímto způsobem lze připravit jak interkalované tak exfoliované nanokompozity. V případě neúplné exfoliace se v systému mohou objevovat interkalované i exfoliované struktury současně. Příprava nanokompozitů mícháním taveniny se jeví jako velmi přitažlivý postup z důvodu jeho jednoduchosti a snadného použití v průmyslu, při využití stávajícího strojního zařízení. Což je ovšem zapláceno velkou obtížností v nalezení způsobu optimální modifikace na mezifázovém rozhraní polymer/jíl. Pro usnadnění vzniku nanokompozitního materiálu, je nutné získat interkaláty s maximální možnou mezivrstvní vzdáleností silikátových destiček. K vyhodnocení úspěšnosti procesu interkalace se používá zejména rentgenová difrakce a mikroskopická pozorování.

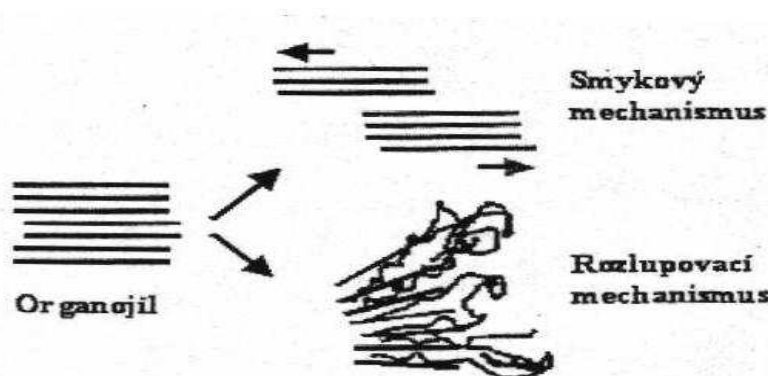
Jistou roli při přípravě nanokompozitů mícháním taveniny hraje také výběr zpracovatelského zařízení a podmínek míchání. Zatím se ukazuje, že prodloužením doby, kterou vzorek putuje technologickým zařízením, může být

dosáhnuo dokonalejší dispergace, exfoliace a orientace nanočástic plniva v polymerní matrici. Na druhou stranu tato delší doba zdržení nemůže ve velké míře ovlivnit samotný interkalační a exfoliační proces bez přítomnosti vhodného interkalačního činidla. Toto činidlo hraje s velkou pravděpodobností klíčovou úlohu v procesu přípravy nanokompozitních systémů polymer/jíl. V případě extrémně dlouhých časů míchání pak dochází k rozlámání dispergovaných destiček jílu tj. zmenšuje se tvarový faktor. Tento fakt následně vede ke zhoršení vlastností nanokompozitního systému jako takového.

Je nutno ještě zmínit disperzní mechanismy, které se při přípravě nanokompozitů kompondací taveniny uplatňují. Jedná se o smykový mechanismus a rozlupovací (difuzní) mechanismus (viz obr 2.7). První z nich je ovlivňován tvarem kompondačního zařízení, jsou nutná vysoká smyková napětí. Příčinou druhého mechanismu je difúze polymerních řetězců do mezivrstvy. Efektivita tohoto mechanismu závisí na kompatibilitě interkalované organické vrstvy s pronikajícími molekulami polymeru a na struktuře interkalátu. Zdá se, že bez dostatečně silného účinku rozlupovacího mechanismu se uplatňuje smykový mechanismus pouze částečně.

V současnosti jsou zkoumány možnosti přípravy elastomerů, např. na bázi styren-butadien-styrenového kopolymeru a silikonového kaučuku. Zvláštností je polyetylénoxid (PEO), který je schopný poskytovat nanosystémy i s přírodní formou montmorillonitu. Tento proces poprvé popsal Balazs a kol.[10]. Ukázal, že je možné získat exfoliované struktury mícháním taveniny polymeru, malého množství polymeru s reakčními koncovými skupinami kompatibilními s přírodním jílem a samotného přírodního jílu. Polymery s reakčními skupinami mohou být nahrazeny diblokovými kopolymery, jejichž jedna část interkaluje, zatímco druhá je svým charakterem blízká polymeru.

Obecně by daný způsob přípravy nanokompozitu měl vést k maximální možné exfoliaci nanoplniva v polymerní matrici za dosažení rovnoměrné dispergace částic. Zároveň nesmí docházet k degradaci polymeru a kompatibilizátorů přítomných v montmorillonitu, ani k destrukci exfoliovaného nanoplniva. Získané výsledky potvrzují, že mícháním taveniny polymeru s organofilizovaným jílem lze úspěšně připravit nanokompozitní systémy.



Obr. 2.7 Mechanismus dispergace [8]

2.4.4 Metoda SOL - GEL [11]

U této metody se tvoří jak anorganická fáze, tak polymerní matrice v průběhu polymerizace. Může se tvořit jak současně tak nebo postupně ve dvou stupních. Takto se dají připravit anorganicko – organické kompozitní materiály s nanostrukturní dispergací složek. Podíl anorganické a organické složky lze prakticky libovolně nastavit. Dokonalý kontakt mezi oběma složkami dává těmto nanokompozitům specifické vlastnosti, které nelze dosáhnout prostým smícháním anorganických částic s taveninou nebo roztokem polymeru. Výsledný materiál vzniká chemickou reakcí za relativně nízké teploty a normálního tlaku. Nejčastější výchozí látkou pro postupy SOL – GEL je derivát silanu známý pod zkratkou TEOS, z kterého lze hydrolýzou a polykondenzací připravit strukturu křemenného skla. Pokud se však vytvoří chemická síť epoxidu, je výsledkem nanostrukturní kompozit. Vzniklý materiál může mít tvar složitých výrobků, tenkých vrstev nebo i fólií.

2.4.5 Charakterizace nanokompozitů typu polymer / jíl [6]

Pro charakterizaci výsledných nanokompozitů se používá dvou hlavních metod a to rentgenografie a elektronové mikroskopie. Tyto metody nám mohou podat informaci o struktuře výsledného materiálu. Informují nás tedy o stupni delaminace (exfoliaci) nanokompozitů. Pro hodnocení výsledných vlastností nanokompozitů se používají zkoušky běžné pro klasické polymerní systémy s ohledem na jejich výsledné použití.

2.5 Smrštění termoplastů [13]

Při vstřikování termoplastů dochází k rozdílu mezi rozměry tvaru dutiny

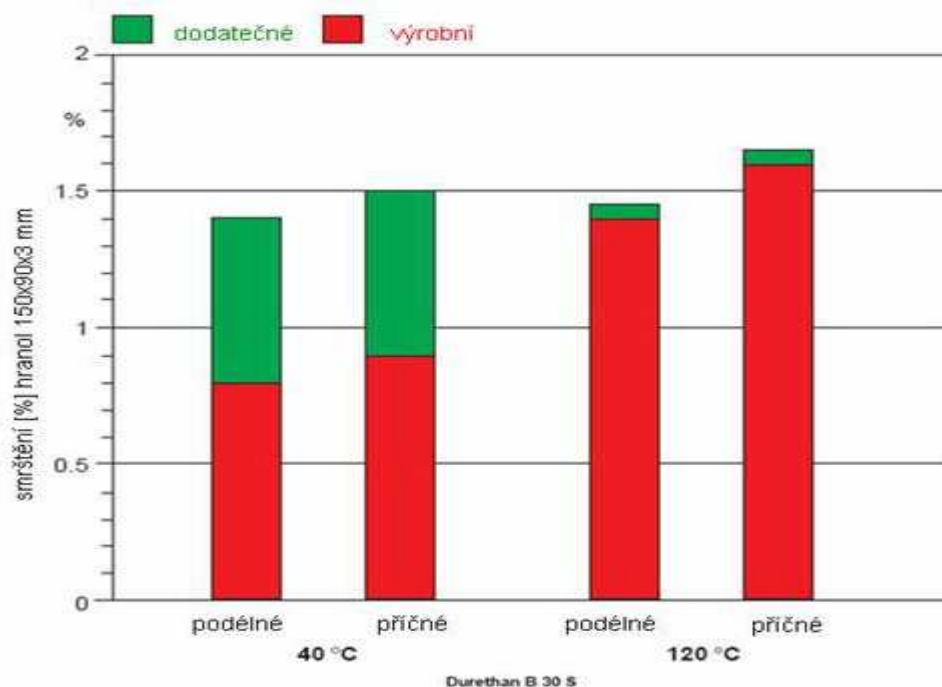
formy a rozměry hotových výstřiků, v závislosti na polymerním materiálu, konstrukci formy a na podmínkách vstřikování [12]. Tyto rozdíly mohou záviset na tvaru a na rozměrech výstřiku, na stupni a směru toku nebo pohybu materiálu ve formě, na velikosti průřezu vtokového kanálu, rozváděcího kanálu a vtokového ústí, dále na cyklu stroje, na teplotě taveniny a teplotě formy a na velikosti a délce trvání dotlaku. Smrštění je způsobeno krystalizací (její průběh je ovlivněn předcházející tepelnou historií, které byl výstřik vystaven) [1], objemovou relaxací, relaxací orientace materiálu a rovněž tepelnou kontrakcí jak termoplastu, tak formy. Na velikost smrštění výstřiků vždy mají vliv také další fyzikální vlivy související s materiálem, jako je např. nadmolekulární struktura a konfigurace řetězce apod.

2.5.1 Stanovení velikosti smrštění u termoplastů [13]

Pro stanovení smrštění termoplastických materiálů se používá v České republice norma ČSN EN ISO 294-4, která zahrnuje také popis vstřikovacího procesu, definuje hodnoty tlaku i dotlaku, včetně jejich tolerance.

Smrštění tak lze rozdělit do tří skupin:

- výrobní smrštění S_M [%]
- dodatečné smrštění S_p [%]
- celkové smrštění S_C [%]



Obr. 2.8 Vliv teploty formy na výrobní a dodatečné smrštění výstřiku (PA6, *Durethan B 30 S*)

Stanovení výrobního a dodatečného smrštění je vhodné pro porovnávání různých termoplastů. Tato metoda nemůže být zdrojem dat pro konstrukční výpočty dílů, ale přináší potřebné informace o typickém chování materiálů. Tyto informace můžeme získat při různých hodnotách teploty taveniny, teploty formy (viz obr. 2.8), vstřikovací rychlosti, dotlaků a dalších vstřikovacích parametrů. Tyto data pak slouží k určení vhodnosti materiálů pro výrobu vstřikovaných dílů s přesnými rozměry.

2.5.2 Výrobní smrštění [13]

Výrobní smrštění je rozdíl rozměrů suchého zkušebního tělesa a tvarové dutiny, v níž bylo zkušební těleso vstřikováno. Rozměry formy i zkušebního tělesa se měří při pokojové teplotě. Vyjadřuje se v procentech daného rozměru tvarové dutiny formy a jeho velikost závisí na orientaci makromolekul. Výrobní smrštění vyjádřené v procentech ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny (S_{Mp}), se stanovuje ve středu šířky zkušebního tělesa a výrobní smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny (S_{Mn}), se stanovuje ve středu délky zkušebního tělesa.

$$S_{Mp} = 100 * (l_c - l_1) / l_c \quad (2.1)$$

$$S_{Mn} = 100 * (b_c - b_1) / b_c \quad (2.2)$$

kde:

l_c je délka ve středu tvarové dutiny [mm]

b_c je šířka ve středu tvarové dutiny [mm]

l_1 je délka zkušebního tělesa [mm]

b_1 je šířka zkušebního tělesa [mm]

2.5.3 Dodatečné smrštění [13]

Dodatečné smrštění (S_p) je rozdíl mezi rozměry vstřikovaného zkušebního tělesa před dodatečnou úpravou (např. lakování, temperace apod.) a po ní. Rozměry se měří při pokojové teplotě. Dodatečné smrštění vzniká především v důsledku sekundární krystalizace, při rychlém ochlazení taveniny plastu v dutině formy v průběhu procesu vstřikování. Dodatečné smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny (S_{Pp}) a dodatečné smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny, (S_{Pn}) jsou dány následujícími rovnicemi:

$$S_{Pp} = 100 * (l_1 - l_2) / l_1 \quad (2.3)$$

$$S_{Pn} = 100 * (b_1 - b_2) / b_1 \quad (2.4)$$

kde:

l_1 je délka zkušebního tělesa [mm]

b_1 je šířka zkušebního tělesa [mm]

l_2 je délka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě [mm]

b_2 je šířka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě [mm]

2.5.4 Celkové smrštění [13]

Celkové smrštění (S_T) je pak rozdíl mezi rozměry zkušebního tělesa po dodatečné úpravě a rozměry tvarové dutiny formy, ve které bylo těleso vstřikováno. Rozměry jsou měřeny při pokojové teplotě. Celkové smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny (S_{Tp}) a celkové smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny, (S_{Tn}) jsou dány následujícími rovnicemi:

$$S_{Tp} = 100 * (l_c - l_2) / l_c \quad (2.5)$$

$$S_{Tn} = 100 * (b_c - b_2) / b_c \quad (2.6)$$

kde:

l_2 je délka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě [mm]

b_2 je šířka zkušebního tělesa po dodatečné úpravě [mm]

l_c je délka ve středu tvarové dutiny [mm]

b_c je šířka ve středu tvarové dutiny [mm]

Vztah mezi výrobním smrštěním, dodatečným smrštěním a celkovým smrštěním je dán následující rovnicí:

$$S_T = S_M + S_P - S_P * S_M / 100 \quad (2.7)$$

Výrobní smrštění a dodatečné smrštění nejsou vyjadřovány jako procenta stejného výchozího rozměru viz rovnice 2.1 - 2.4. Celkové smrštění proto není přesný součet výrobního smrštění a dodatečného smrštění. Poslední člen rovnice 2.7 lze však ve většině případů vynechat.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bakalářské práce je stanovit závislost výrobního smrštění polymerního nanokompozitu na technologických podmínkách vstřikování, konkrétně při různých teplotách taveniny a temperačního média.

3.1 Příprava polymerního nanokompozitu [14]

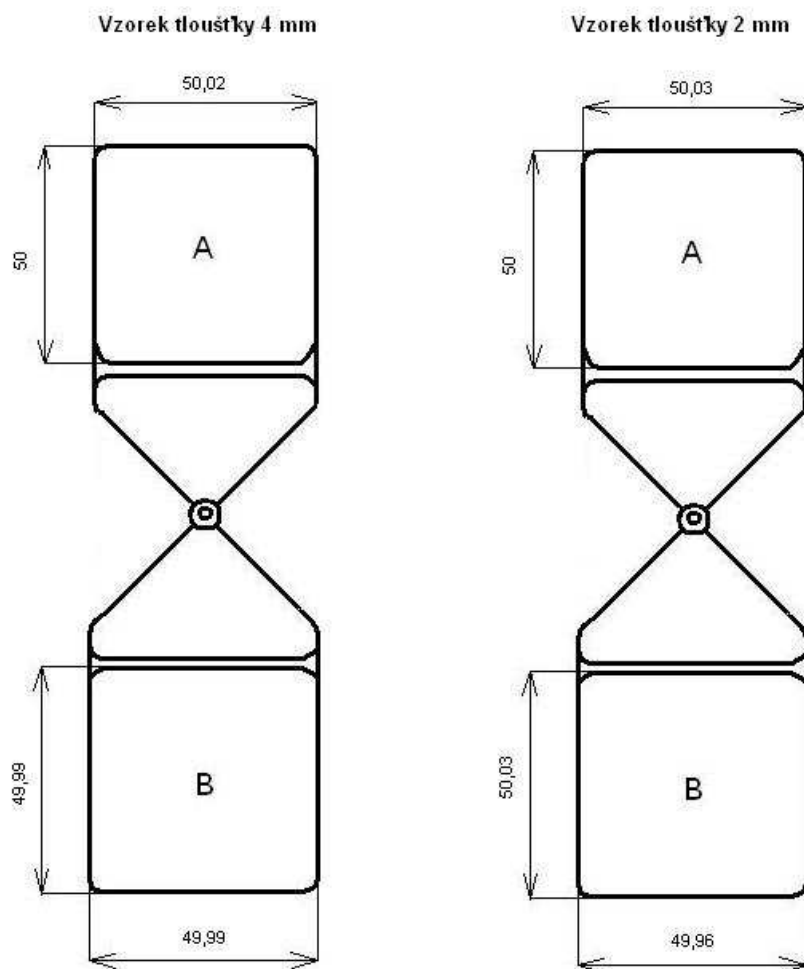
K experimentálnímu stanovení velikosti výrobního smrštění výstřiku bylo použito polypropylenu Mosten GB 005 jako základní matrice. Polypropylen Mosten GB 005 je homopolymer se střední distribucí molekulových hmotností pro víceúčelové použití. Tento materiál vyráběný firmou Chemopetrol je vhodný pro vstřikování, pro výrobu tkacích pásků, provazů, motouzů a také k výrobě fólií pro následné tvarování. Jako plnivo byl využit Nanoblend koncentrát od firmy PolyOne. Výsledný nanokompozit byl vytvořen smícháním nanoblend koncentrátu obsahujícího 40 hmot.% nanočástic s polypropylenem Mosten GB 005, tak aby byl ve výsledku dosažen hmotnostní poměr nanočástic a polymerní matrice 6 : 94. Takto vytvořená polymerní směs byla následně vstřikována do dutiny formy.

3.2 Zhotovení zkušebních vzorků a volba technolog. parametrů

Zkušební vzorky (viz obr. 3.1) o velikosti 50x50x2 a 50x50x4 mm byly pro hodnocení smrštění vyrobeny na vstřikovacím stroji Engel ES 55/25 (viz obr. 3.2). Norma ČSN EN ISO 294-4 hovoří o použití formy k výrobě zkušebních těles o rozměrech 60x60x2, která však nebyla pro naše měření k dispozici. Velikost tloušťky stěny zkušebního tělesa byla zvolena na dvou úrovních: 2 a 4 mm. Rozsah 2-4 mm pokrývá tloušťky stěn většiny technických výstřiků. Zahrnutí další hodnoty tloušťky stěny by značně navýšilo počet měření v experimentu, a proto byl tento parametr ponechán na dvou úrovních.

Základní technologické parametry při vstřikování termoplastů jsou: teplota taveniny, teplota formy, vstřikovací tlak, dotlak, doba dotlaku, doba plnění formy a doba chlazení výstřiku ve formě. Zkušební tělesa o různé tloušťce byla zhotovena při třech teplotách taveniny a třech teplotách cirkulujícího teplonosného média (vody) v temperačních kanálech vstřikovací formy (třech teplot temperace). Ostatní technologické parametry včetně doby

cyklu byly při výrobě zkušebních těles konstantní (viz tab. 3.1). Konstantní doba cyklu (60 s) byla zajištěna nastavením doby manipulace v závislosti na době plastikace nové dávky.



Obr. 3.1 Velikost vzorků bez smrštění v mm



Obr. 3.2 Vstřikovací lis Engel ES 55/25

Tab. 3.1 Technologické podmínky vstřikování

parametr / jednotka	hodnota		
teplota taveniny [°C]	200	220	240
teplota temperačního média [°C]	20	40	60
vstřikovací tlak [MPa]	4		
dotlak [MPa]	4		
teplota v I. pásmu stroje [°C]	135	150	165
teplota v II. pásmu stroje [°C]	115	130	145
teplota v III. pásmu stroje [°C]	105	110	125
doba vstřiku a dotlaku [s]	25		
doba chlazení po plastikaci [s]	15		
celková doba cyklu [s]	60		
uzavírací síla [kN]	55		

Zkušební tělesa (viz obr. 3.3) byla tedy vstřikována při různě nastavených technologických parametrech vstřikovacího stroje. V rámci experimentu byla pro výrobu vzorků použita dvojnásobná vstřikovací forma s jednou dělicí rovinou, kuželovým vtokem a filmovým ústím vtoku, které zajišťuje rovnoměrné plnění tvarové dutiny formy, ale vyžaduje bohužel dodatečné oddělení od výstřiku. Vtoková soustava formy včetně tvarových dutin byla konstruována tak, aby byla tavenina plastu vstřikována na dělicí rovinu. Vlastní kuželový vtok ústí do rozváděcích kanálů, jejichž délka odpovídá délce vtokového ústí. Tavenina nejdříve zaplní rozváděcí kanály a z nich pak vstupuje do tvarových dutin.

3.3 Měření vzorků [13]

Zkušební tělesa vyrobená vstřikováním (viz obr. 3.3) byla ponechána ve standardním prostředí 23/50 dle ISO 291, tj. při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 %. Změřena byla délka l_c a šířka b_c tvarových dutin mezi příslušnými referenčními body (viz obr. 3.5).



Obr.3.3 Zkušební tělesa z nanokompozitu

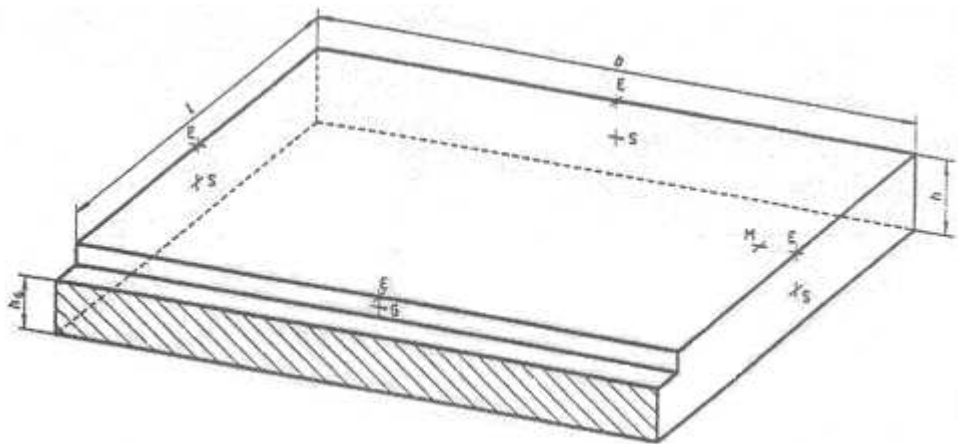
Měření rozměrů vzorků bylo prováděno na digitálním úchylkoměru Mitutoyo ID-F150 s dosažitelnou přesností měření 0,001 mm umístěném ve speciálně zhotoveném měřicím přípravku (viz obr. 3.4). U všech vzorků byla měřena délka l_1 a šířka b_1 v referenčních bodech, které byly umístěné stejně jako při měření tvarové dutiny (viz obr. 3.5). Norma ČSN EN ISO 294-4 uvádí jako minimum pět zkušebních těles pro každou skupinu podmínek vstřikování. Pro větší přesnost bylo měření prováděno na deseti vzorcích pro každou skupinu, v závislosti na teplotě taveniny a teplotě temperačního média.



Obr. 3.4 Měřicí přípravek s měřidlem Mitutoyo ID-F150

3.4 Výpočet výrobního smrštění [13]

Naměřené výsledky rozměrů zkušebních těles v závislosti na tloušťce výrobku, teplotě taveniny a teplotě formy jsou uvedeny v tab. 3.2 až tab. 3.7. Z deseti naměřených hodnot byly vypočítány aritmetické průměry rozměrů těles z tvarových dutin A a B. Dle vztahů (2.1) a (2.2) bylo pak vypočítáno výrobní smrštění výstřiků.



Obr. 3.5 Perspektivní zobrazení zkušební tělesa po odstranění vtokového kanálku
[13]

Tab. 3.2 Velikost vzorků tloušťky 2 mm při teplotě temperačního zařízení T_m 20 °C

Teplota formy T_F [°C]	20		
Teplota taveniny T_t [°C]	200	220	240
Průměrný rozměr l_1 vzorku A ve směru toku taveniny [mm]	49,18	49,36	49,43
Průměrný rozměr b_1 vzorku A ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,19	49,38	49,49
Průměrný rozměr l_1 vzorku B ve směru toku taveniny [mm]	49,28	49,41	49,51
Průměrný rozměr b_1 vzorku B ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,13	49,29	49,41

Tab. 3.3 Velikost vzorků tloušťky 2 mm při teplotě temperačního zařízení T_m 40 °C

Teplota formy T_F [°C]	40		
Teplota taveniny T_t [°C]	200	220	240
Průměrný rozměr l_1 vzorku A ve směru toku taveniny [mm]	49,25	49,39	49,45
Průměrný rozměr b_1 vzorku A ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,25	49,41	49,50
Průměrný rozměr l_1 vzorku B ve směru toku taveniny [mm]	49,22	49,45	49,52
Průměrný rozměr b_1 vzorku B ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,20	49,32	49,42

Tab. 3.4 Velikost vzorků tloušťky 2 mm při teplotě temperačního zařízení T_m 60 °C

Teplota formy T_F [°C]	60		
Teplota taveniny T_t [°C]	200	220	240
Průměrný rozměr l_1 vzorku A ve směru toku taveniny [mm]	49,33	49,40	49,45
Průměrný rozměr b_1 vzorku A ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,33	49,43	49,48
Průměrný rozměr l_1 vzorku B ve směru toku taveniny [mm]	49,40	49,46	49,50
Průměrný rozměr b_1 vzorku B ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,24	49,33	49,42

Tab. 3.5 Velikost vzorků tloušťky 4 mm při teplotě temperačního zařízení T_m 20 °C

Teplota formy T_F [°C]	20		
Teplota taveniny T_t [°C]	200	220	240
Průměrný rozměr l_1 vzorku A ve směru toku taveniny [mm]	49,29	49,35	49,33
Průměrný rozměr b_1 vzorku A ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,31	49,35	49,35
Průměrný rozměr l_1 vzorku B ve směru toku taveniny [mm]	49,31	49,34	49,33
Průměrný rozměr b_1 vzorku B ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,35	49,38	49,37

Tab. 3.6 Velikost vzorků tloušťky 4 mm při teplotě temperačního zařízení T_m 40 °C

Teplota formy T_F [°C]	40		
Teplota taveniny T_t [°C]	200	220	240
Průměrný rozměr l_1 vzorku A ve směru toku taveniny [mm]	49,29	49,34	49,32
Průměrný rozměr b_1 vzorku A ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,31	49,35	49,34
Průměrný rozměr l_1 vzorku B ve směru toku taveniny [mm]	49,31	49,33	49,31
Průměrný rozměr b_1 vzorku B ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,35	49,36	49,35

Tab. 3.7 Velikost vzorků tloušťky 4 mm při teplotě temperačního zařízení T_m 60 °C

Teplota formy T_F [°C]	60		
Teplota taveniny T_t [°C]	200	220	240
Průměrný rozměr l_1 vzorku A ve směru toku taveniny [mm]	49,29	49,30	49,29
Průměrný rozměr b_1 vzorku A ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,32	49,33	49,32
Průměrný rozměr l_1 vzorku B ve směru toku taveniny [mm]	49,30	49,30	49,29
Průměrný rozměr b_1 vzorku B ve směru kolmém na tok taveniny [mm]	49,33	49,33	49,31

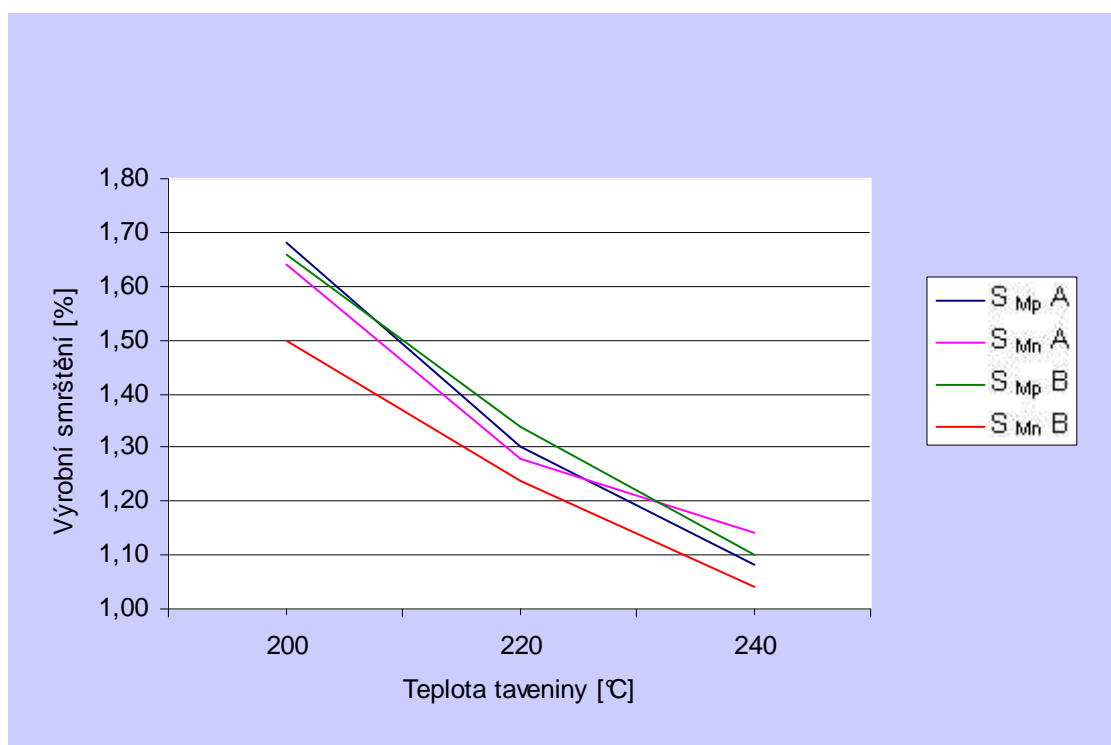
Výsledné hodnoty výrobního smrštění v podélném a v příčném, v závislosti na tloušťce výstřiku, teplotě taveniny a temperačního média je přehledně uvedeno v tab. 3.8

Tab. 3.8

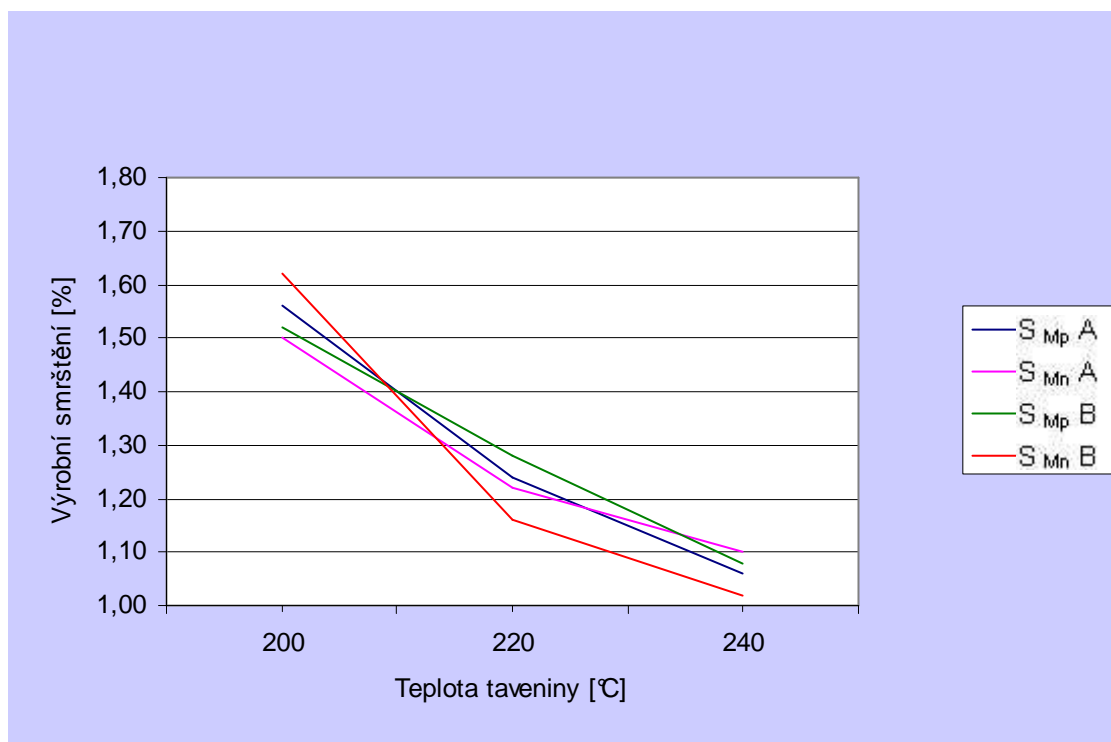
Tloušťka vzorku [mm]	T _F [°C]	T _t [°C]	S _{Mp} vzorku A [%] + směrodatná odchylka		S _{Mn} vzorku A [%] + směrodatná odchylka		S _{Mp} vzorku B [%] + směrodatná odchylka		S _{Mn} vzorku B [%] + směrodatná odchylka	
2	20	200	1,679	0,052	1,648	0,044	1,655	0,038	1,495	0,036
		220	1,301	0,014	1,286	0,017	1,333	0,016	1,233	0,011
		240	1,089	0,010	1,140	0,008	1,103	0,007	1,039	0,000
	40	200	1,569	0,034	1,506	0,029	1,529	0,030	1,615	0,022
		220	1,237	0,007	1,222	0,004	1,285	0,013	1,155	0,018
		240	1,065	0,008	1,106	0,008	1,079	0,007	1,021	0,007
	60	200	1,411	0,042	1,348	0,026	1,447	0,027	1,255	0,021
		220	1,195	0,010	1,202	0,007	1,261	0,016	1,143	0,010
		240	1,075	0,013	1,118	0,011	1,097	0,010	1,049	0,010
4	20	200	1,409	0,012	1,410	0,014	1,270	0,016	1,358	0,022
		220	1,325	0,015	1,304	0,013	1,214	0,021	1,294	0,011
		240	1,333	0,008	1,328	0,010	1,238	0,011	1,324	0,013
	40	200	1,417	0,015	1,418	0,022	1,298	0,015	1,368	0,020
		220	1,339	0,012	1,324	0,014	1,252	0,012	1,312	0,012
		240	1,361	0,014	1,364	0,010	1,274	0,038	1,362	0,015
	60	200	1,397	0,011	1,422	0,011	1,320	0,008	1,378	0,011
		220	1,385	0,019	1,404	0,024	1,330	0,020	1,378	0,026
		240	1,397	0,011	1,426	0,011	1,350	0,010	1,406	0,011

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUSE

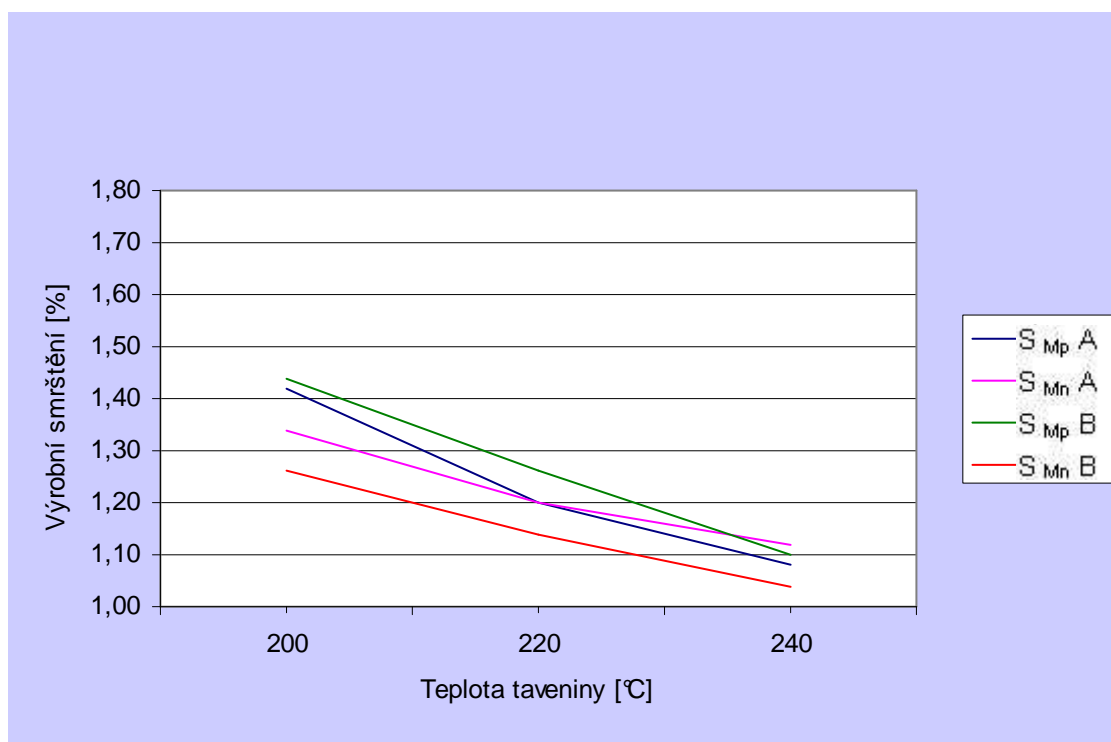
Velikost výrobního smrštění výstřiku v závislosti na teplotě taveniny a teplotě formy pro výstřik o tloušťce 2 mm je graficky vyjádřen na obr. 4.1 až obr. 4.3, pro výstřik o tloušťce 4 mm pak na obr. 4.4 až obr. 4.6.



Obr. 4.1 Výrobní smrštění vzorku tloušťky 2 mm při změně teploty taveniny a teplotě formy 20 °C

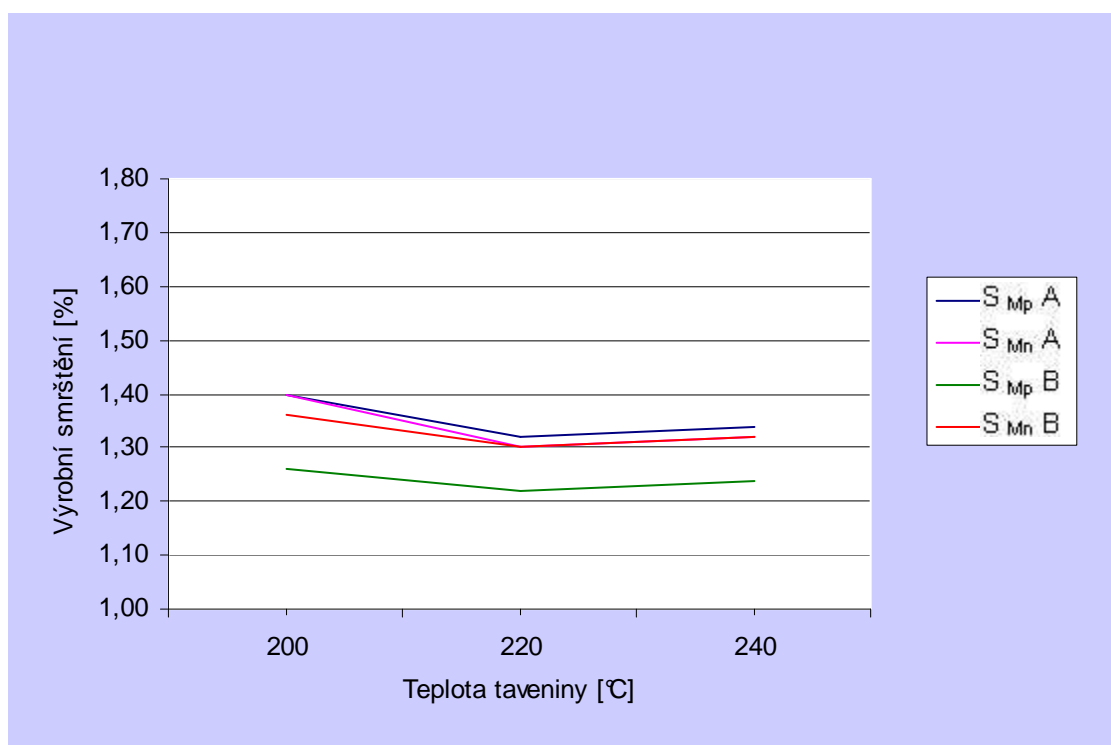


Obr. 4.2 Výrobní smrštění vzorku tloušťky 2 mm při změně teploty taveniny a teplotě formy 40°C

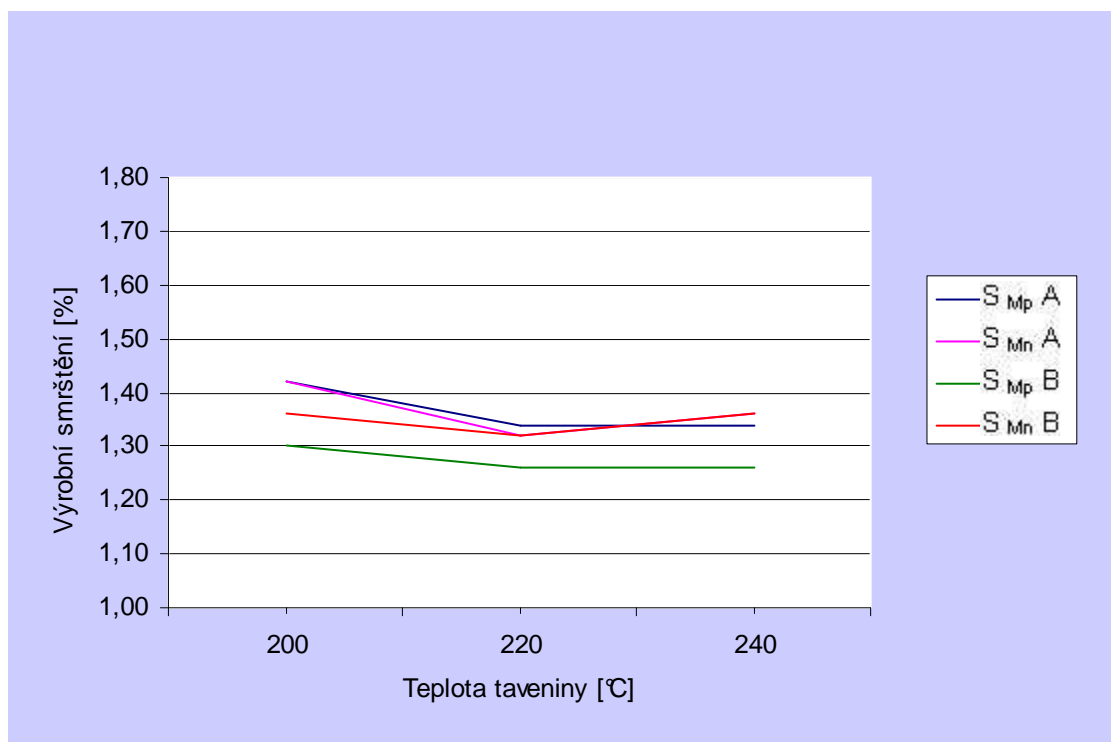


Obr. 4.3 Změna rozměrů vzorku tloušťky 2 mm při změně teploty taveniny a teplotě formy 60 °

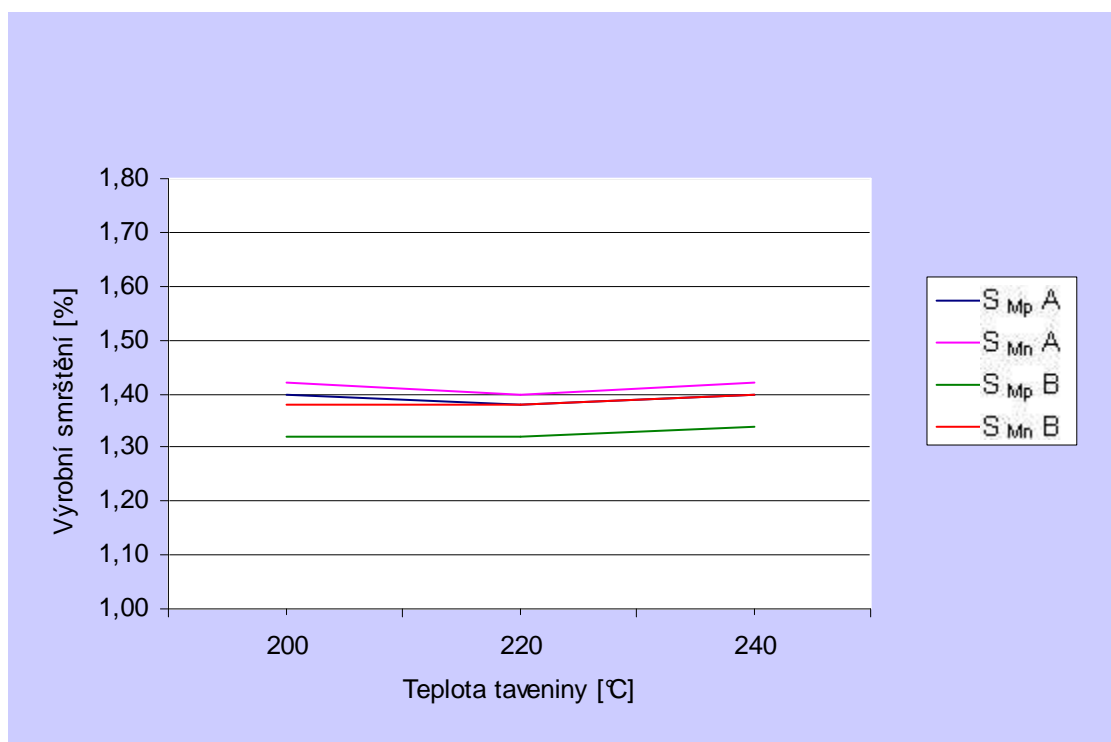
Z naměřených hodnot smrštění nanokompozitu při různých podmínkách vstřikování jednoznačně vyplývá, že nejvyšší hodnotu výrobního smrštění vykazují vzorky tloušťky 2 mm při teplotě taveniny 200 °C a teplotě formy 20 °C a 40 °C (viz obr. 4.1 a 4.2). Naopak nejmenší výrobní smrštění je u vzorků s tloušťkou 2 mm a teplotou taveniny 240 °C (viz obr. 4.1 až 4.3). Výrobní smrštění zkušebních těles z polymerního nanokompozitu vykazuje v podélném i v příčném směru se zvyšujícími se hodnotami technologických parametrů: teplotou formy, teplotou taveniny klesající tendenci. Tyto tendence jsou v souladu s teoretickými předpoklady, protože vyšší hodnoty obou těchto parametrů působí na zvýšení vnitřního tlaku v tvarové dutině formy, což vede ke snižování výrobního smrštění.



Obr. 4.4 Změna rozměrů vzorku tloušťky 4 mm při změně teploty taveniny a teplotě formy 20 °C



Obr. 4.5 Změna rozměrů vzorku tloušťky 4 mm při změně teploty taveniny a teplotě formy 40 °C



Obr. 4.6 Změna rozměrů vzorku tloušťky 4 mm při změně teploty taveniny a teplotě formy 60 °C

U vzorků tloušťky 4 mm je výrobní smrštění při všech nastavených technologických parametrech, takřka shodné (viz obr. 4.4 až obr. 4.6). Velikost výrobního smrštění se snižuje s rostoucí tloušťkou stěny, což je v podstatě dáno rychlým průběhem ochlazování při stejném nastavení doby chlazení pro obě tloušťky výstřiků. Větší hodnoty výrobního smrštění u tloušťky 2 mm než u tloušťky 4 mm byly naměřeny při kombinaci parametrů s nejnižšími hodnotami teploty taveniny a temperačního média, což je pravděpodobně způsobeno většími tlakovými ztrátami při plnění dutiny formy o menším průřezu a nižší viskozitou taveniny.

5 ZÁVĚR

Při dnešním, stále se rozšiřujícím použití polymerních nanokompozitů, je třeba dokonale znát jejich vlastnosti. Jak ukazují výsledky i této práce je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost znalosti závislosti výrobního smrštění na rozdílných technologických podmínkách vstřikování. Znalost těchto závislostí může například přispět k omezení nepřesností při návrhu formy i při vlastní výrobě vstřikovacích dílů.

Jsem si vědom, že tato bakalářská práce řeší jen určitou část problematiky rozměrových změn výstřiků. Při řešení práce nebylo z důvodů rozsahu práce zjišťováno dodatečné smrštění, jehož velikost by výrazně ovlivňovala tvarovou a rozměrovou stabilitu výstřiku. Rovněž výslednou velikost výrobního smrštění by mohlo ovlivnit podíl procentuálního zastoupení nanoblend koncentrátu ve výsledném nanokompozitu. Při vstřikování nebyly uvažovány vlivy rychlosti plnění dutiny formy, doby dotlaku, druhu vtokového ústí atd.. V tomto směru je třeba při dalším řešení uvedené problematiky v navazujících studiích pokračovat.

Z uvedeného experimentálního měření lze však konstatovat, že velikost výrobního smrštění u zvoleného polymerního nanokompozitu klesá s rostoucí teplotou taveniny a při nižších tloušťkách výstřiků rovněž s rostoucí teplotou temperace vstřikovací formy. Stejně tak klesá velikost výrobního smrštění výstřiku s jeho rostoucí tloušťkou stěny. Při vyšší tloušťce stěny výstřiku nebyl shledán vliv teploty taveniny, ani teploty temperačního média formy, na velikost výrobního smrštění.

Bakalářská práce byla členěna do třech hlavních kapitol. V první, teoretické části bakalářské práce byl uveden význam polymerního nanokompozitu nabízející široké možnosti jeho uplatnění v technické praxi. Uveden byl zde také význam nanoblend koncentrátů, které patří mezi nejčastěji používaná plniva nanokompozitů. V neposlední řadě byl zde uveden rozbor problematiky smrštění u plastových výstřiku.

V druhé části bakalářské práce bylo provedeno experimentální měření vlivu technologických parametrů vstřikování na výrobní smrštění u polymerních nanokompozitů. Výrobní smrštění bylo zde posuzováno na výstřicích tvaru desky tloušťky 2 a 4 mm o rozměrech 50 x 50 mm.

Z hodnocení dosažených výsledků vyplývá, že na velikost výrobního smrštění má rozhodující vliv tloušťka výstřiku, teplota taveniny a teplota

temperačního média formy, což je uvedeno v třetí části bakalářské práce. Výsledky práce je možné použít pro přesnější návrh dutin vstřikovacích forem a také ke korekcím rozměrů výstřiků změnou technologických podmínek vstřikování polymerních nanokompozitů.

Literatura

- [1] KREBS, J. - SOVA, A. a kol.: *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashöfer, 1999-2004
- [2] CLAUS, J.: *Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen Stand 07.10.2004 Arbeitsausschuss Statistik und Marktforschung*. PlasticsEurope Deutschland (<http://www.vke.de>)
- [3] ORTH, P.: Průmysl plastů, *Plasty a kaučuk* 41(3), POLENG Zlín, 2004,s. 16-18
- [4] LENFELD, P.; BIDLAS, V. aj.: *Nanokompozity – ano či ne*, *Plasty – konstrukční materiály*, Sborník přednášek ze 4. Mezinárodní konference konané v Praze ve dnech 10. – 11.3.2005, Praha: PLAST FORM SERVICE, 2005. s.29 - 34
- [5] BIDLAS, V.: *Nanokompozity s termoplastickou maticí pro technologii vstřikování*, TU Liberec DP, Liberec, 2005
- [6] <http://www.ipt.arc.nasa.gov/nanotechnology.html>
- [7] <http://www.polyone.com>
- [8] KALEDOVÁ, A.: *Možnosti přípravy nanokompozitních materiálů typu polymer / jíl a metody jejich hodnocení*, *Plasty a kaučuk* 41(3), POLENG Zlín, 2004,s. 11-15
- [9] VAIA, R. A.; ISHII, H. aj.: *Chemical Materials*, 1993,s. 1694 – 1696
- [10] BALASZ, A. ; SINGH, C. aj.: *Macromolecules* 1998,s. 8370 – 8381
- [11] LAPČÍK, L. - RAAB, M.: *Nauka o materiálech II*. Zlín : UTB ve Zlíně, 2000. 115 s. ISBN 80-238-6527-7
- [12] HISEM, P.: *Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiků z termoplastů*, TU Liberec Dis.P, Liberec, 2003
- [13] ČSN EN ISO 294-4
- [14] <http://www.chemopetrol.cz>

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 14.5.2006

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date 14.5.2006

Signature